

УДК 532.5.013.4:536.25

© 1994 г. А. М. ВЕТОШКИН, А. В. КОРОЛЬКОВ, В. В. САВИЧЕВ

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ЖИДКОСТИ И СИСТЕМЫ ЖИДКОСТЬ — ГАЗ В УСЛОВИЯХ, БЛИЗКИХ К НЕВЕСОМОСТИ

Проведено обобщение результатов исследований особенностей поведения жидкости при тепловой гравитационной конвекции во внутренних, внешних и сопряженных задачах в условиях, близких к невесомости. Приведены результаты расчетов течений в системе жидкость — газ в переменном поле вектора ускорения.

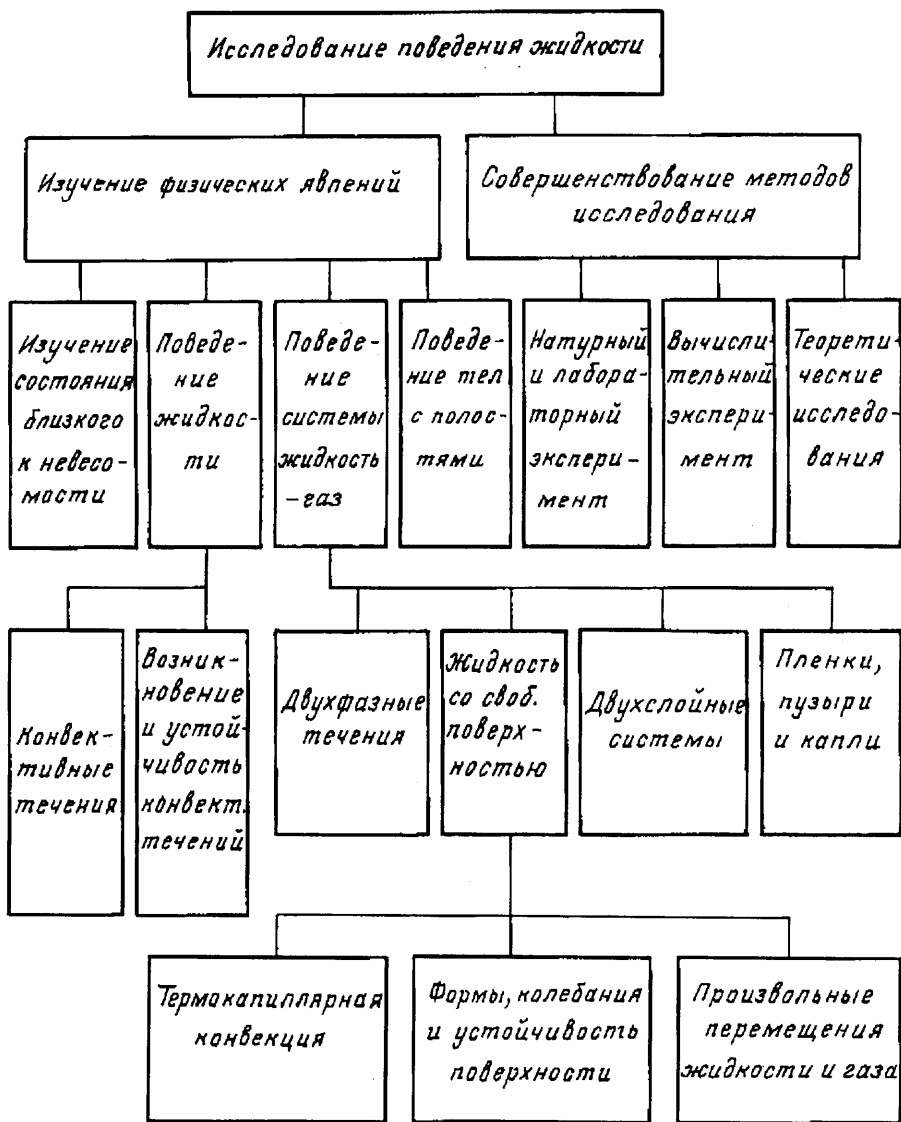
Состояние, реализуемое на борту космического аппарата во время космического полета на околоземной орбите, характеризуется как состояние, близкое к невесомости. Особенностью этого состояния являются пространственные эволюции вектора ускорения, определяемые различными факторами [1—3].

Остаточные ускорения на борту космического аппарата изучались теоретически из анализа траектории полета [4] и на основе анализа жесткостных характеристик системы [1]. Непосредственные измерения малых ускорений на борту проводились с помощью специальных приборов, определяющих величины составляющих ускорения отдельно по каждой из осей координат [2]. Полученные данные анализировались с целью определения характерных закономерностей изменения вектора ускорения и увязки этих закономерностей с режимами функционирования космического аппарата. Результаты анализа впервые опубликованы в [3], а затем более полно — в [1, 5].

На пассивном участке траектории полета станции «Салют-6» изменение вектора местного ускорения происходит в основном в плоскости XU , перпендикулярной оси станции Z . Составляющие вектора ускорения по осям X и U примерно на порядок больше, чем составляющая вдоль Z . Причем с большой степенью точности поле вектора ускорения во всем сечении станции плоскостью XU является однородным. Местные ускорения, вызванные колебаниями корпуса станции от возмущающего воздействия функционирующих на борту систем и механизмов, деятельности экипажа, изменяют свои составляющие по осям координат по гармоническому закону с различными частотами и различными амплитудами. В частности, в некоторых случаях изменение вектора ускорения близко к вращению постоянного по величине вектора с постоянной угловой скоростью. Если работают двигательные установки, то к местному вектору ускорения добавляется постоянная составляющая. Постоянная составляющая вектора ускорения может оказаться заметной и при выключенных двигателях, например когда станция находится в состоянии гравитационной стабилизации и измерения проводятся на большом расстоянии от центра масс станции.

При анализе результатов измерения малых ускорений было установлено, что для многих технологических процессов, протекающих на борту орбитальных научных станций, период изменения вектора ускорений и характерные гидродинамические времена примерно одного порядка, следовательно, при математическом моделировании этих процессов необходимо учитывать пространственную эволюцию вектора ускорения.

Поведение жидкости или системы жидкость — газ в переменном поле вектора ускорения зависит от соотношений большого количества определяющих параметров. Многообразие задач, возникающих при исследовании поведения жидкости (системы жидкость — газ) в условиях, близких к невесомости, проиллюстрировано



Фиг. 1

на фиг. 1. В настоящей статье представлены результаты работ по решению некоторых из указанных задач, сделаны обобщения ранее опубликованных данных, сформулированы новые задачи и приведены результаты их решения.

Исследование особенностей поведения жидкости в заполненном сосуде в условиях, близких к невесомости, проводилось численно на основе решения системы дифференциальных уравнений переноса, результаты этих исследований опубликованы в [3, 5, 6]. Получены данные о структуре и интенсивности течения при тепловой гравитационной конвекции для внутренних, внешних и сопряженных задач в сосудах различных форм при различных законах изменения вектора ускорения. Основным результатом проведенных исследований можно считать выделение области значений относительной угловой скорости изменения направления вектора ускорения, при которых роль тепловой гравитационной конвекции в переносе тепла остается существенной.

Особенности развития тепловой гравитационной конвекции определяются законом изменения вектора ускорения. Для характерных состояний, близких к невесо-

N	Закон изменения \mathbf{g}	g^*	ω^*
0	$\mathbf{g} = \text{const}$	$ \mathbf{g} $	0
1	$g_x = g^\circ \sin(\omega t)$ $g_y = g^\circ \cos(\omega t)$	g°	$\frac{\omega R^2}{a}$
2	$g_x = g^\circ \sin(\omega t) + g_x'$ $g_y = g^\circ \cos(\omega t) + g_y'$	g°	$\frac{2\omega R^2 \arctg(d)}{\pi a \sqrt{1+d^2}}$
3	$g_x = g_x^\circ \sin(\omega t)$ $g_y = g_x^\circ \cos(\omega t)$	$\min(g_x, g_y)$	$\frac{\omega R^2}{a}$
4	$g_x = g^\circ \sin(\omega_x t)$ $g_y = g^\circ \cos(\omega_y t)$	g°	$\frac{\max(\omega_x, \omega_y) R^2}{a}$

мости, удастся выделить некоторые общие закономерности и увязать их с определяющими параметрами задачи. Вектор-функция $\mathbf{g}(t)$ описывает два свойства вектора ускорения — изменение его величины и направления. При регулярном периодическом изменении вектора ускорения второе свойство (изменение направления) можно охарактеризовать периодом обращения вектора или некоторой масштабной угловой скоростью. В число Грасгофа $Gr = g^* \beta_r \Delta T R^3 / \nu^2$ входит масштабное значение модуля вектора ускорения g^* . В таблице представлены соотношения, которые следует использовать при определении этой величины, и показаны значения безразмерных масштабных угловых скоростей ω^* , используемых для определения относительной угловой скорости для внутренней и внешней задач соответственно по формулам

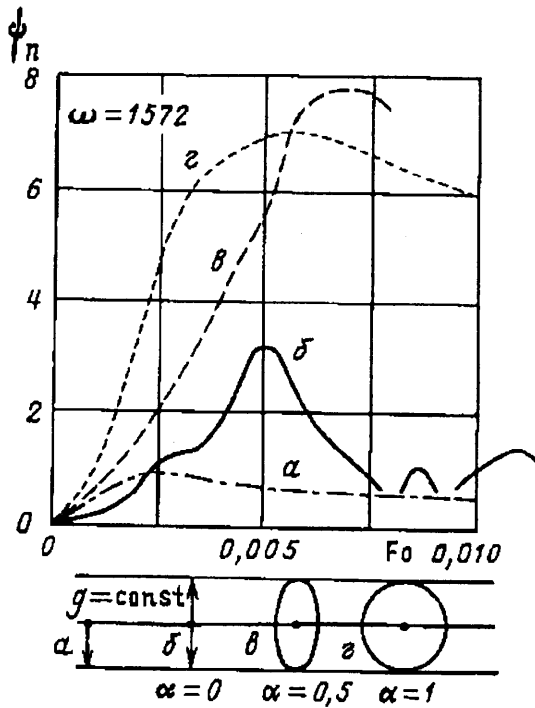
$$\Omega_u = \frac{\omega^*}{Pr \sqrt{Gr}}, \quad \Omega_v = \frac{3}{2} \frac{\omega^*}{Pr \sqrt{Gr}}$$

В таблице использованы обозначения: g_x, g_y — составляющие вектора \mathbf{g} по осям X и Y ; ω_x, ω_y — круговые частоты изменения по гармоническому закону проекций вектора \mathbf{g} на оси X и Y ; $g^\circ, g_x^\circ, g_y^\circ$ — соответствующие амплитуды; g_x', g_y' — компоненты постоянной составляющей вектора \mathbf{g} ; $d = |g^\circ|/|g'|$.

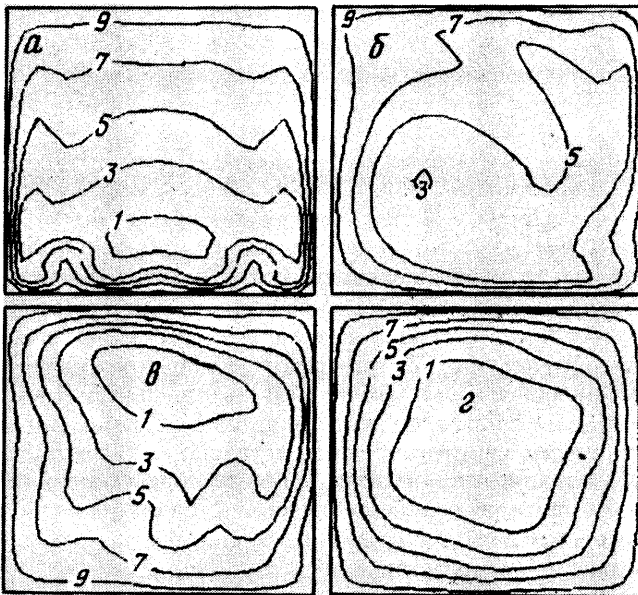
В строке 0 таблицы представлен случай постоянного вектора ускорения, в строке 1 — вращения с постоянной угловой скоростью по модулю вектора, в строке 2 — случай, когда вектор ускорения складывается из двух компонент — вращающейся g° и постоянной g' , в строках 3 и 4 — случай вектора, проекции которого изменяются по гармоническому закону с различными амплитудами и различными частотами, соответственно.

Приведенные в таблице законы изменения вектора ускорения являются идеализированными описаниями реальных состояний, однако в большинстве случаев на отдельных временных участках реальный закон изменения вектора ускорения можно заменить одним из представленных в таблице.

Определенные выше относительные угловые скорости вращения (изменения направления) вектора ускорения позволяют с единых позиций сформулировать основной результат исследований, описанный в [3, 5, 6] следующим образом: при значениях Ω_u (для внутренней задачи) или Ω_v (для внешней задачи) в диапазоне от 0 до 2 конвективные процессы гравитационной природы играют определяющую роль и при моделировании таких процессов следует учитывать закон изменения вектора ускорения по возможности полно. Во внутренних задачах при $0 < \Omega_u < 2$ за счет формирования температурного расслоения появляется дополнительное движение, связанное с перемещением расслоенного по температуре



Фиг. 2



Фиг. 3

ядра жидкости, способное увеличить интенсивность течения и теплообмена.

Примеры увеличения интенсивности конвективного движения в поле переменного вектора ускорения по сравнению с интенсивностью конвективного движения в постоянном поле показаны на фиг. 2. Вектор ускорения изменяется по закону, представленному в таблице строкой 3, при различных $\alpha = g_x/g_y$,

($\alpha = 0, 0,5, 1$). Интенсивность конвективного движения ψ_n характеризуется отношением текущего максимального значения функции тока для заданного α к максимальному значению функции тока, полученному в постоянном поле вектора ускорения.

В качестве примера увеличения интенсивности теплообмена при естественной конвекции в переменном поле вектора ускорения по сравнению с интенсивностью теплообмена в постоянном поле на фиг. 3 представлены поля температур, соответствующие моменту времени $t = 0,001$, полученные при тепловой гравитационной конвекции внутри цилиндрического сосуда с квадратным основанием от нагретых (граничные условия первого рода) стенок в поле вращающегося вектора ускорения $\Omega u = 0$ (а), 0,628 (б), 1,256 (в), 2,512 (г). Максимальная степень прогрева ($T_{cp} = 0,631$) достигнута при $\Omega u = 0,628$, тогда как и при меньших скоростях вращения ($\Omega u = 0$, $T_{cp} = 0,568$) и больших ($\Omega u = 1,256$, $T_{cp} = 0,544$, и $\Omega u = 2,512$, $T_{cp} = 0,46$) степень прогрева остается ниже.

При $\Omega u > 2$ (для внутренней задачи) или $\Omega v > 2$ (для внешней) конвективное движение подавлено и с ростом Ωu (Ωv) все в большей степени основным механизмом переноса тепла является теплопроводность.

Сформулированные выше положения можно использовать и при анализе поведения жидкости в сопряженной задаче при тепловой гравитационной конвекции в переменном поле вектора ускорения. Сопоставляя вычисленные для внешней и внутренней областей значения Ωv и Ωu соответственно, можно утверждать, что при $0 < \Omega v < 2$ и $0 < \Omega u < 2$ в обеих областях роль конвекции существенна, при $\Omega v > 2$ и $\Omega u > 2$ следует ожидать подавления конвективного течения в обеих областях. Для более детального анализа особенностей развития конвективных процессов во внешней и внутренней областях сопряженной задачи следует использовать подход, описанный в работе [6].

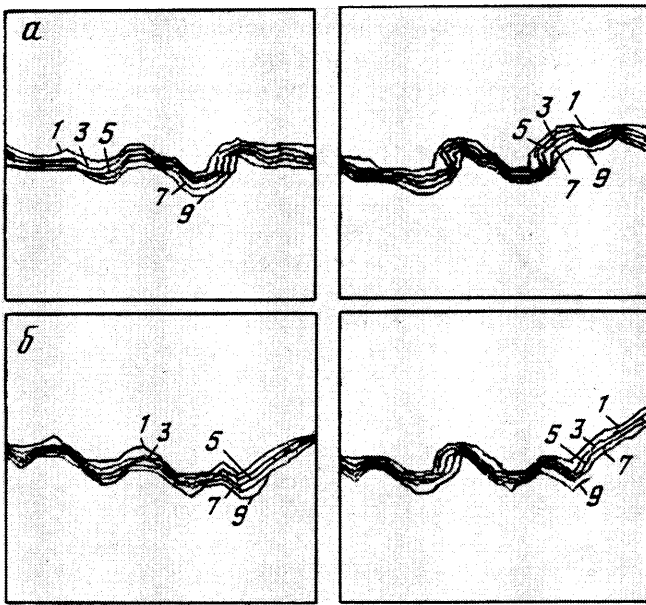
В частично заполненном сосуде в переменном поле вектора ускорения роль тепловой конвекции в формировании структуры течения жидкости, как правило, является несущественной (за исключением редких случаев, например таких, как исследованный в работе [7]). Основное течение связано с изменением взаимного расположения объемов жидкости и газа. В соответствии с классификацией, представленной на фиг. 1, можно выделить две задачи.

В случае преобладания капиллярных сил над силами плавучести, порождаемыми разностью плотностей жидкости и газа (эта ситуация реализуется при низких уровнях местного ускорения), возникает задача определения формы поверхности раздела сред и колебаний этой поверхности около своего равновесного состояния.

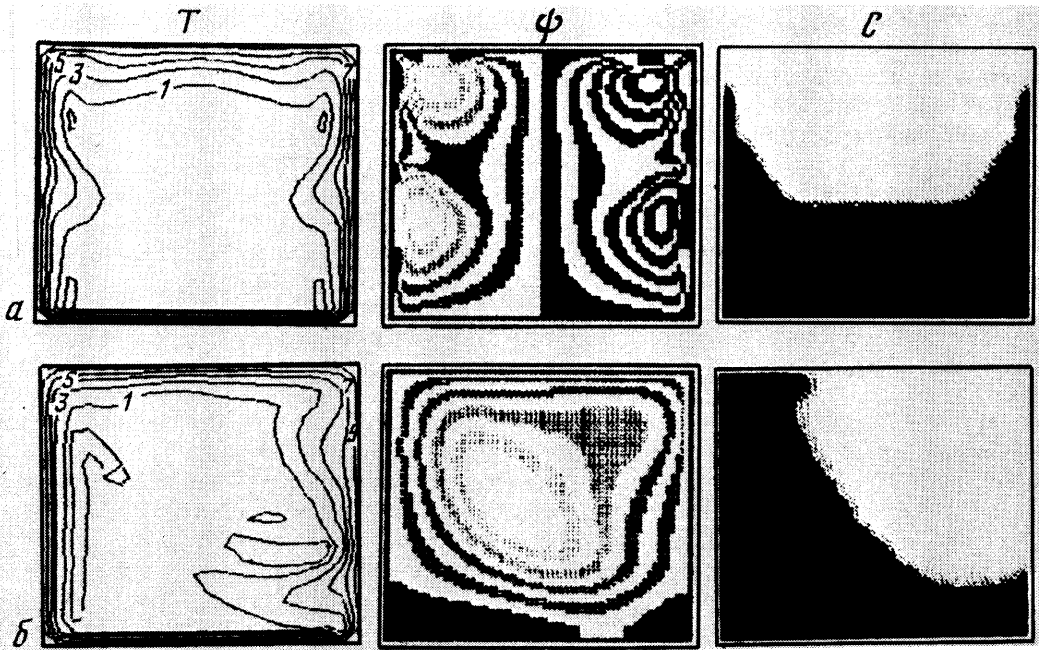
В случае преобладания массовых сил может быть сформулирована задача изучения произвольных перемещений объемов жидкости и газа относительно друг друга. При этом возможны нарушения гладкости и односвязности поверхности раздела, образования капель, пузырей, ударные воздействия на стенки сосуда. Решение таких задач представляет особый практический интерес и при проектировании и эксплуатации систем подачи топлива и систем управления космическим аппаратом.

При численном моделировании процессов, связанных с изменением положения поверхности раздела сред, используют различные подходы, основанные на явном выделении поверхности раздела сред. Эти подходы обеспечивают относительно высокую точность решения, однако имеют ограниченное применение в задачах изучения произвольных перемещений жидкости. В связи с этим для решения задач с произвольными перемещениями жидкости и газа был выбран метод сквозного счета. Математическая модель и ее численная реализация представлена в [8].

Результатом исследования произвольных взаимных перемещений объемов жидкости и газа в частично заполненном сосуде могут служить функция изменения во времени координат центра масс системы жидкость — газ и динамика движения поверхности раздела сред.



Фиг. 4



Фиг. 5

В качестве примера на фиг. 4 приводятся результаты расчета колебаний поверхности жидкости от возмущения, вызванного внезапным изменением направления действия силы тяжести ($Ga = 10^6$, $Pr = 1$, отношение плотностей газа и жидкости равно 0,001). С момента времени $t = 0$ к постоянному вектору ускорения добавляется осциллирующая составляющая вдоль оси X (амплитуда $0,01g$, частота 10 000). Представлены последовательные положения поверхности раздела сред при условии отсутствия трения на стенках без учета (а) и с учетом

(б) сил поверхностного натяжения, характеризуемых комплексным параметром $\Sigma = Gr Pr^2/Bo$ ($\Sigma = 0$ и 10 соответственно) для моментов времени $t = 0,00074$ (слева) и $0,00077$ (справа). Видно, что поверхность раздела сред совершает нелинейные нерегулярные колебания относительно своего равновесного состояния. Вклад сил поверхностного натяжения выражается в некотором сглаживании формы поверхности.

На фиг. 5 представлены поля температур, функций тока и функции $C(x, y)$, характеризующей относительные положения двух несмешивающихся жидкостей в емкости при тепловой гравитационной конвекции в поле постоянного ($\Omega u = 0$) и переменного (вращающегося с угловой скоростью $\Omega u = 1$) вектора ускорения. Подвод тепла осуществлялся от нагретых до фиксированной температуры стенок (граничные условия первого рода). В расчете $Gr = 10^6$, $Ga = 10^6$, $Pr = 1$ (вычислены по параметрам более тяжелой жидкости) плотности легкой и тяжелой жидкости различались в 2 раза. Коэффициенты температурного расширения, кинематической вязкости и температуропроводности для легкой и тяжелой жидкостей были приняты равными. В постоянном поле вектора ускорения деформация поверхности раздела вызвана конвективным движением жидкостей. В переменном поле граница раздела успевает «отследить» изменение направления вектора местного ускорения, создавая дополнительное циркуляционное движение системы двух жидкостей. Более быстрое изменение направления вектора ускорения может привести к более значительным деформациям и даже к разрушению границы раздела сред.

Таким образом, пространственные эволюции вектора ускорения на борту космического аппарата создают условия возникновения особенностей в поведении жидкости или системы жидкость — газ. Эти особенности проявляются в увеличении интенсивности конвективного движения и теплообмена в заполненном жидкостью сосуде и в реализации произвольных относительных перемещений жидкости и газа в частично заполненном сосуде. Осуществление космических полетов и использование их для реализации различных технологических процессов ставят задачу детального исследования этих интересных гидродинамических явлений, основой для изучения которых может служить вычислительный эксперимент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеевский В. С., Лиходед А. И., Савичев В. В. и др. Пространственная эволюция вектора остаточных ускорений на борту космических аппаратов//Космич. исслед. 1988. Т. 26. Вып. 4. С. 621—625.
2. Гришин С. Д., Дубовской В. Б., Обьеденников С. С., Савичев В. В. Исследование малых ускорений на борту орбитальной научной станции «Салют-6»//Технологические эксперименты в невесомости. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 6—14.
3. Авдеевский В. С., Корольков А. В., Купцова В. С., Савичев В. В. Исследование тепловой гравитационной конвекции в переменном поле вектора малых ускорений//ПМТФ. 1987. № 1. С. 54—59.
4. Лебедев А. П., Полежаев В. И. Математическое моделирование возмущающих ускорений в экспериментах космической технологии//Гидромеханика и тепломассообмен в невесомости. М.: Наука, 1982. С. 163—173.
5. Ветошкин А. М., Корольков А. В., Купцова В. С., Савичев В. В. Об особенностях развития конвективных процессов в условиях, близких к невесомости//Инж. физ. журн. 1992. Т. 62. № 2. С. 235—242.
6. Ветошкин А. М., Корольков А. В., Купцова В. С., Савичев В. В. Об особенностях развития естественной конвекции в условиях, близких к невесомости//Космич. наука и техника. Киев: Наук. думка, 1989. Вып. 4. С. 53—57.
7. Корольков А. В. Взаимодействие тепловой гравитационной и термокапиллярной конвекций в частично заполненном сосуде в переменном поле вектора ускорения//Изв. АН БССР. Сер. физ.-энерг. наук. 1991. № 1. С. 82—87.
8. Корольков А. В. Численное моделирование методом сквозного счета поведения системы жидкость — газ в переменном поле вектора ускорения//Изв. РАН, МЖГ. 1994. № 5. С. 129—134.